

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Pada penelitian [13] membahas permasalahan tentang belum adanya infrastruktur jaringan LoRa di wilayah Palabuhanratu dan kepadatan *end device* di Palabuhanratu yang menyebabkan proses pengiriman data pada jaringan menjadi terhambat. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan menganalisis hasil simulasi parameter *Signal Level*, *Level Carrier Noise to Interference*, dan *Link Budget* sebagai acuan perencanaan infrastruktur jaringan LoRa. Kemudian penelitian ini terbagi menjadi dua tahap, pada tahap 1 membahas tentang perhitungan kapasitas (*capacity*) dan cakupan (*coverage*) dan tahap 2 terkait dengan simulasi menggunakan *software* Atoll dengan *templates* *Low Power Wide Area*. Dari penelitian tersebut, didapatkan *output* yaitu tentang kapasitas *gateway* sebanyak 10 unit dengan radius sel 1,261 km untuk wilayah Palabuhanratu dan didapatkan nilai rata-rata parameter seperti, *Signal Level* sebesar -64,06 dBm (kategori "good"), *Level Carrier Noise to Interference* yang bernilai 27,71 dB (kategori "excellent"), serta *Link Budget* yang mendapatkan nilai *Path loss* -107,74 dBm pada radius sel 1,261 km.

Pada penelitian [14] membahas permasalahan yang terkait dengan pemeliharaan dan pemantauan *Optical Distribution Cabinet* (ODC) yang penting untuk memastikan ketersediaan dan kinerja optimal, tetapi pendekatan konvensional seringkali mahal dan sulit dilakukan sehingga dibutuhkan sistem pemantauan perangkat ODC berbasis IoT yang efektif dan terjangkau dalam jaringan FTTH di area perkotaan. Metode yang digunakan yaitu mengembangkan jaringan LoRaWAN untuk menentukan jumlah *gateway* yang dibutuhkan dalam area penelitian seluas 188,96 km², melakukan simulasi perencanaan jaringan LoRaWAN menggunakan aplikasi Atoll 3.4.0 dengan parameter lebar pita 125 kHz, frekuensi 920 MHz, dan *Spreading factor* (SF) 10, melakukan perhitungan *Link Budget*, sensitivitas LoRa, MAPL, EIRP, radius sel, area sel, dan jumlah *gateway* yang dibutuhkan, serta menganalisis parameter kinerja RSSI dan SNR untuk mengevaluasi kualitas sinyal. Dari penelitian tersebut, menunjukkan nilai

parameter RSSI sebesar -70,35 dBm (kategori baik) dan SNR sebesar 17,33 dBm (kategori baik), jumlah *gateway* yang terbatas (9 *gateway*) memungkinkan penggunaan SF 10 yang memberikan perencanaan jaringan yang *cost-effective* dan menghasilkan kinerja yang baik, serta dalam area penelitian seluas 188,96 km², direkomendasikan untuk menggunakan 9 *gateway* LoRa dengan *Spreading factor* (SF) 10.

Pada penelitian [15] membahas permasalahan yang terkait dengan pemborosan energi listrik di industri menyebabkan pembengkakan anggaran produksi dan belum optimalnya *monitoring* konsumsi energi listrik di industri. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan melakukan perancangan jaringan LoRaWAN untuk konektivitas *smart* meter di Kawasan Industri Karawang menggunakan perangkat lunak simulasi Forsk Atoll 3.3.2, perhitungan *Link Budget* dan prediksi cakupan serta kapasitas, serta analisis hasil simulasi parameter RSRP, *throughput*, dan SNR. Dari penelitian tersebut, didapatkan *output* seperti dibutuhkan 38 *gateway* untuk mencakup Kawasan Industri Karawang, nilai RSRP rata-rata -77,94 dBm (kategori baik), *throughput* berkisar 4-6 kbps dengan rata-rata 5,47 kbps, dan nilai SNR rata-rata 13,14 dB.

Pada penelitian [16] membahas permasalahan yang terkait dengan perancangan jaringan LoRaWAN di sisi *coverage* untuk mengetahui berapa jumlah *gateway* yang dibutuhkan untuk mengcover semua area di Kabupaten Gresik dan perancangan *smart* meter berbasis IoT untuk memaksimalkan dan memudahkan masyarakat terutama pada kebutuhan listrik di Kabupaten Gresik. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan melakukan simulasi menggunakan *software* Atoll versi 3.4.0, perhitungan *Link Budget*, sensitivitas LoRa, *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL), *Cell* radius, luas *cell*, dan jumlah *gateway*, dan menganalisis hasil simulasi berupa perbandingan parameter *spreading factor*, SNR, RSSI, dan jumlah *gateway*. Dari penelitian tersebut, didapatkan *output* berupa jumlah *gateway* terbanyak diperoleh dengan SF 7 yaitu 77 *gateway*, sedangkan paling sedikit dengan SF 12 yaitu 35 *gateway*, diketahui bahwa semakin besar SF yang digunakan, maka semakin meningkat kualitas sinyal tetapi mengurangi kekuatan sinyal dan juga *gateway* yang lebih sedikit, dan didapatkan hasil bahwa desain *smart* meter berbasis IoT dapat

memaksimalkan dan memudahkan masyarakat terutama pada kebutuhan listrik di Kabupaten Gresik.

Pada penelitian [17] membahas permasalahan yang terkait dengan kinerja LoRa pada area rural berdasarkan parameter jarak dan *spreading factor* terhadap RSSI, *delay*, dan *packet loss* dan pembuktian jika penggunaan *spreading factor* yang lebih tinggi, apakah dapat meningkatkan performa LoRa pada kondisi NLoS (*Non Line of Sight*). Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan perancangan dan pengujian perangkat LoRa melakukan pengujian dilakukan dengan variasi jarak dan *spreading factor*, dengan lokasi pengujian berada pada area rural di Desa Pulau Gambar, Kabupaten Serdang Bedagai, dan parameter yang diukur meliputi RSSI, *delay*, serta *packet loss*. Dari penelitian tersebut, didapatkan *output* bahwa pada kondisi NLoS mempengaruhi nilai RSSI dan *packet loss*, semakin tinggi *spreading factor* dapat mengurangi *packet loss* dan menambah jarak jangkauan meskipun kondisi NLoS, *spreading factor* tinggi meningkatkan *delay* karena memperlambat kecepatan transmisi data, dan secara keseluruhan kinerja LoRa cukup baik hingga menjangkau hampir seluruh wilayah Desa Pulau Gambar.

Pada penelitian [18] membahas permasalahan yang terkait dengan belum adanya jaringan LoRa di Kota Surabaya untuk beberapa tahun ke depan. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan penentuan parameter perhitungan seperti *bandwidth*, *spreading factor*, *coding rate*, RSSI, SNR, dilakukan perhitungan kapasitas jaringan berdasarkan jumlah *user* (*capacity planning*), perhitungan cakupan area berdasarkan luas wilayah (*coverage planning*), dan simulasi perencanaan jaringan menggunakan *software* Atoll. Dari penelitian tersebut, didapatkan hasil bahwa dibutuhkan 20 *site gateway* LoRa untuk melayani jaringan LoRa di Kota Surabaya, total pengguna 12% dari total pelanggan listrik, air dan gas, didapatkan hasil radius cakupan seluas 2,642 km, RSSI sebesar -93,93 dBm, SNR sebesar -7,77 dB, dan perencanaan tersebut dapat terpenuhi jika diimplementasikan di Kota Surabaya pada tahun 2025 karena, menghasilkan kualitas sinyal yang bagus.

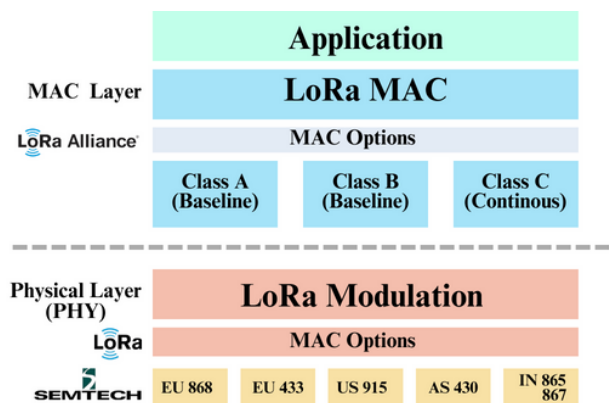
Pada penelitian [19] membahas tentang kebutuhan untuk merencanakan jaringan LoRaWAN yang optimal di Kota Bandung untuk mendukung

perkembangan *Smart City* dan aplikasi *Internet of Things* (IoT) di kota tersebut dan cara membandingkan nilai *spreading factor* dengan desain jaringan LoRaWan terhadap jumlah *gateway*. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan dilakukannya simulasi menggunakan *software* simulasi Forsk Atoll 3.4.0 dan Matlab untuk menganalisis perbandingan parameter seperti *Spreading factor*, SINR, *Effective Signal*, dan jumlah *gateway*, dan menggunakan parameter seperti *spreading factor* 7 hingga 12. Hasil simulasi pada perancangan ini, menunjukkan bahwa SF 7 membutuhkan lebih banyak *gateway* daripada SF lainnya, kinerja kekuatan sinyal (*Effective Signal Analysis*) pada SF 7 mencapai -68,32 dBm, dan kualitas sinyal (SNR) pada SF 12 mencapai 10,87 dBm.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Long Range (LoRa)

Long Range atau LoRa merupakan suatu teknologi nirkabel berdaya rendah yang digunakan jarak jauh untuk meningkatkan masa pakai baterai perangkat, mendukung lebih banyak perangkat yang terhubung, dan meningkatkan kapasitas dan ketahanan jaringan. Teknologi LoRa terdiri dari dua lapisan, fisik dan *Media Access Control* (MAC), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, Lapisan fisik, yang dibuat oleh *Semtech* dan didasarkan pada *Chirp Spread Spectrum* (CSS), memberikan sensitivitas tinggi bagi penerima dan meningkatkan ketahanan terhadap kebisingan berkat penggunaan pesan koreksi kesalahan penerusan. LoRaWAN distandarisasi oleh *LoRa Alliance* dan merupakan protokol lapisan MAC dan desain arsitektur sistem. Pita Industri, Ilmiah, dan Medis (ISM) menggunakan spektrum radio tanpa izin untuk teknologi LoRa [20].



Gambar 2.1 Protokol Teknologi LoRa

2.2.2 Teknologi Long Range (LoRa)

Teknologi LoRa menggunakan modulasi propagasi spektral dengan koreksi kesalahan. Teknik ini pertama-tama dikembangkan untuk digunakan pada pita ISM (Industri, Ilmiah, dan Medis) pada frekuensi di bawah 1,0 GHz yang diatur oleh Uni Telekomunikasi Internasional (di Brasil, frekuensinya adalah 915 MHz). Radar juga menggunakan modulasi CSS (*Chirp Spread Spectrum*). Landai berfungsi sebagai sinyal *Chirp*. Perpindahan jalur landai ini, yang mencakup seluruh pita dan amplitudonya konstan, mengangkut data [21].

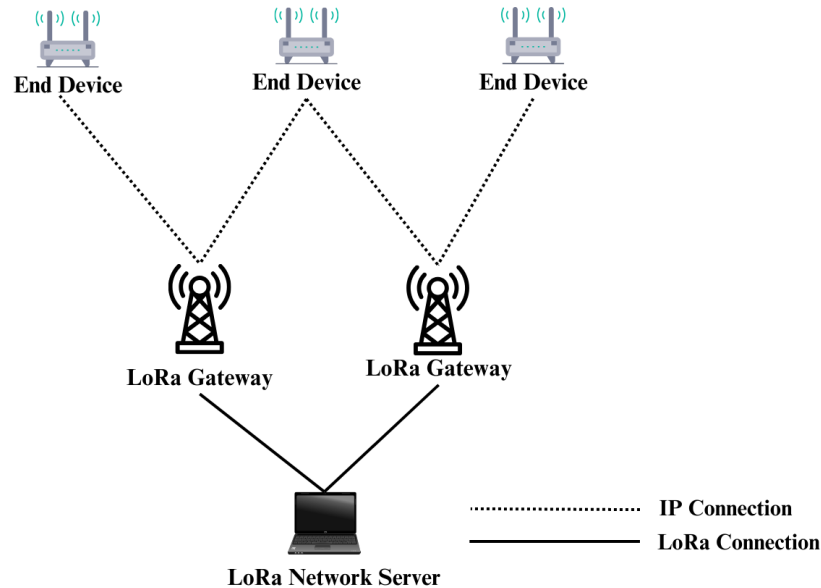
Modulasi frekuensi yang dimodifikasi, juga dikenal sebagai penguncian frekuensi-frekuensi, memungkinkan pengiriman data dalam jarak puluhan kilometer. Modulasi LoRa yang dipatenkan *Semtech* digunakan pada tingkat fisik, dan ini bekerja pada pita frekuensi ISM yang ditentukan oleh wilayah geografis tempat sensor beroperasi. Sensor LoRa memiliki keuntungan bahwa mereka beroperasi pada *bandwidth* bebas lisensi ISM (Industri, Ilmiah, dan Medis), sehingga tidak perlu membayar lisensi tambahan. Aplikasi dapat memiliki tingkat yang lebih tinggi daripada level MAC, yang sudah ditetapkan oleh *LoRa Alliance*. Teknologi ini dapat diimplementasikan secara *open-source* oleh pengguna karena tidak dihubungkan dengan operator jaringan seluler [22].

Parameter bawaan perangkat, seperti *spreading factor*, Chip Rate, dan *bandwidth*, dapat diubah untuk menyamakan sensitivitas penerimaan, jangkauan, dan kecepatan transmisi. Nilai SF dapat berkisar antara 7 dan 12 dan berdampak pada sensitivitas penerima menjadi meningkat, ketahanan terhadap interferensi, dan kecepatan transmisi dengan nilai 12 memiliki ketahanan tertinggi, dan nilai 7 memiliki tingkat penalaran tertinggi. Di sisi lain, CR dapat dikonfigurasi dengan mengubah nilainya menjadi nilai yang lebih rendah. Tingkat transmisi yang lebih tinggi dapat dicapai dengan meningkatkan *bandwidth*, tetapi kesalahan lebih sering terjadi dengan *bandwidth* yang lebih tinggi. Pada tabel 2.1 merupakan hubungan *bit rate*, SF, dan sensitivitas penerima [21].

Tabel 2.1 Hubungan *Bit Rate*, *Spreading factor* dan Sensitivitas *Receiver* [20]

SF	<i>Bit Rate</i>	<i>Sensitivitas Receiver (Rx)</i> .
12	0,25	-137
11	0,44	-135
10	0,98	-133

9	1,7	-130
8	3,1	-129
7	5,4	-124



Gambar 2.2 Arsitektur *Long Range*

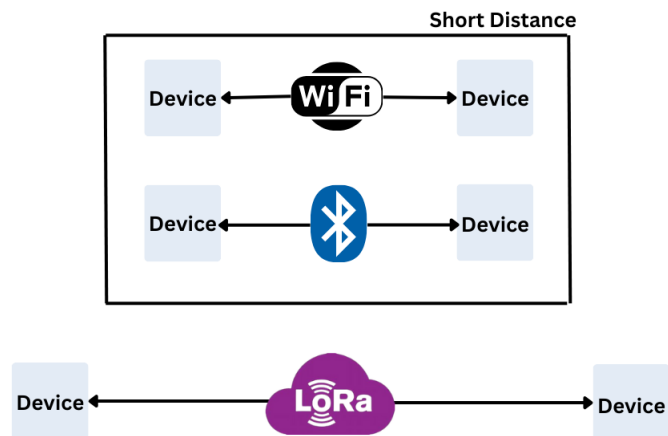
Tiga komponen utama yang terdapat didalam topologi jaringan komunikasi (Arsitektur) LoRa terdapat pada gambar 2.2 [23]. Bagian dari arsitektur LoRa dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *End devices*, diartikan sebagai perangkat yang terhubung dengan sensor/akuator. *End device* berfungsi sebagai antarmuka yang mengumpulkan informasi data yang diperoleh, lalu mengirimkannya ke *physical layer* jaringan LoRa dan selanjutnya diteruskan menuju *gateway*. Jika sebuah *end device* berada pada area cakupan dari dua buah *gateway* sekaligus, maka *end device* tersebut akan mengirimkan informasi data ke kedua *gateway* tersebut.
2. *LoRa gateway*, merupakan komponen yang berfungsi sebagai penghubung antara perangkat (*device*) dan *server* jaringan. Perannya adalah meneruskan paket data yang dikirim dari perangkat menuju *server* jaringan.
3. *Netserver* yang berfungsi sebagai jaringan antarmuka ke semua jaringan mulai dari *end node*, *gateway*, *database* dan *server* sehingga pengguna dapat memonitor kinerja perangkat secara langsung [23].

Terdapat regulasi yang mengatur frekuensi LoRa bekerja, yang dimana pada setiap negara memiliki regulasi frekuensinya masing-masing yaitu pada frekuensi 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 923 MHz. Namun, untuk Republik Indonesia regulasi yang digunakan yaitu pada rentang frekuensi 923-925 MHz dengan *bandwidth* 125 KHz sesuai dengan ketentuan *Lora Alliance* pada Kawasan Asia [24].

2.2.3 Keunggulan dan Kekurangan LoRa

LoRa memiliki kelebihan dibandingkan dengan jenis komunikasi lainnya seperti seluler, *Bluetooth*, dan WIFI. Bisa berkomunikasi jarak jauh seperti seluler, tetapi hemat daya seperti *Bluetooth*, membuatnya ideal untuk perangkat sensor yang bertahan lama dengan baterai dan memiliki cakupan area yang luas. Keterbatasan kecepatan transmisi data LoRa antara 0,3 kbps dan 50 kbps tidak akan menjadi masalah selama data berukuran kecil. Jenis aplikasi ini cocok untuk berbagai jenis jaringan sensor nirkabel. Komunikasi LoRa menggunakan media dan protokol radio yang berbeda dengan media dan protokol yang digunakan oleh jaringan internet seperti yang terdapat pada gambar 2.3. *Gateway* harus berfungsi sebagai *interface* antara kedua jenis jaringan ini agar data sensor node dapat dikirim ke *server* aplikasi yang dimaksud [25].



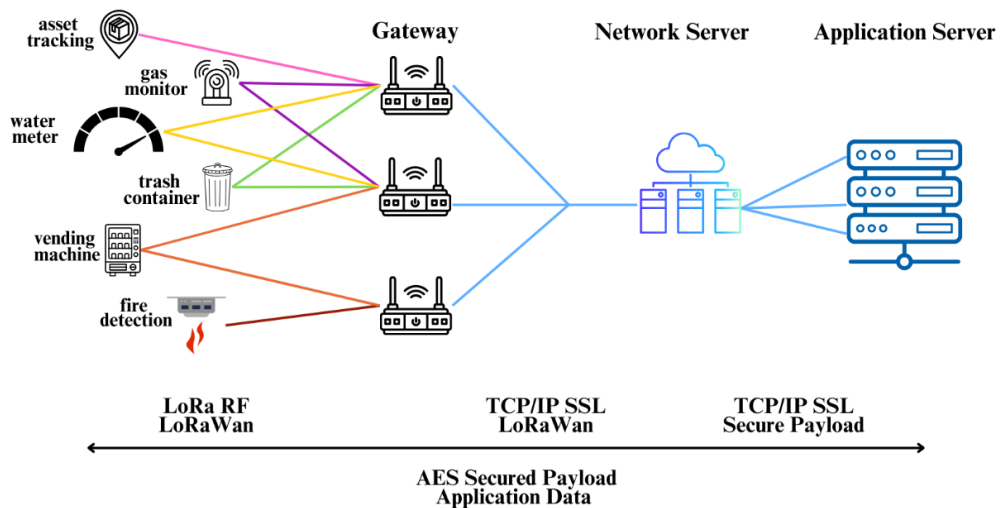
Gambar 2.3 Komunikasi Pada LoRa

Salah satu kelemahannya dari teknologi LoRa adalah memiliki keterbatasan bahwa interferensi sinyal dengan urutan penyebaran yang sama dapat menyebabkan cakupan jaringan turun secara eksponensial seiring dengan jumlah *node* yang terhubung. Hal tersebut menjadi penghalang utama dan dapat berdampak lebih besar pada skalabilitas LoRa. Namun, permasalahan tersebut dapat minimalisir

dengan metode *polling* untuk manajemen sinyal [26]. Selain itu, pada komunikasi LoRa tidak dapat mengirim data secara langsung ke *cloud server*, jadi diperlukan sebuah *gateway* untuk mengirimkan data ke *cloud server* [27].

2.2.4 Arsitektur LoRaWan

Teknologi LoRA membentuk struktur jaringan LoRaWAN. LoRaWAN adalah protokol jaringan yang dibangun di atas teknologi LoRa oleh *LoRa Alliance*. Jaringan LoRa bertopologi *star* menggunakan *gateway*. *Network server* dan banyak *node* terhubung ke *gateway* di satu sisi. Jaringan LoRa terdiri dari empat komponen: perangkat, *gateway*, jaringan *server*, dan aplikasi pengguna. Arsitektur dari jaringan LoRaWAN digambarkan pada Gambar 2.4 [28].



Gambar 2.4 Arsitektur LoRaWan

Bagian dari arsitektur LoRaWan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *End Device*, memiliki peranan sebagai sensor atau aktuator yang terhubung ke jaringan LoRaWAN melalui gateway LoRaWAN. Data dari aplikasi yang dikirimkan melalui perangkat ini dialihkan ke server aplikasi yang terhubung ke *cloud*.
2. *LoRaWan Gateway Device*, memiliki peranan dalam mengirimkan paket radio ke server jaringan melalui *backbone*. Perangkat ini menerima paket radio dari udara dan meneruskannya ke server jaringan tanpa memprosesnya. Selain itu, perangkat ini tidak mengubah muatan yang berasal dari server jaringan agar dapat diunggah melalui udara.
3. *Network Server*, memiliki peranan dalam memverifikasi alamat perangkat akhir, mengautentikasi frame, menyesuaikan kecepatan data, dan berinteraksi

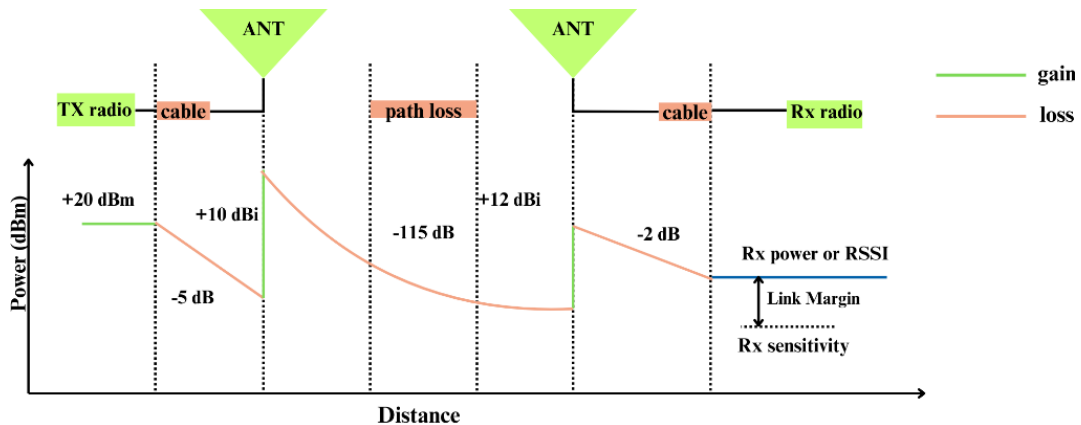
dengan server aplikasi dan server *Join*. NS memiliki tiga peran (*Home, Serving, Forwarding*) yang bergantung pada situasi dan jenis *roaming*.

4. *Application Server*, memiliki peranan dalam mengelola semua muatan lapisan aplikasi dari Perangkat Akhir LoRaWAN terkait dan menyediakan layanan tingkat aplikasi untuk pengguna akhir [29].

2.2.5 Parameter *Long Range*

2.2.5.1 *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*

Received Signal Strength Indicator atau RSSI dapat diartikan sebagai parameter yang menunjukkan tingkat daya yang diukur yang diterima oleh radio klien yang terhubung jarak jauh, yang biasanya menunjukkan seberapa baik radio tertentu dapat mendengar radio klien yang terhubung jarak jauh [25]. Dengan jarak pancar yang lebih jauh, sinyal yang diterima akan semakin lemah dan waktu pengiriman data akan semakin lama. *Noise, multi-path fading*, transmisi daya, dan gangguan adalah beberapa faktor yang memengaruhi RSSI. Nilai RSSI yang dihasilkan, yang ditunjukkan dalam dBm dan bernilai negatif, akan menghasilkan sinyal yang baik. Pada gambar 2.5 merupakan skema dari RSSI, dimana pada skema tersebut dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan (2.1) dan (2.2) [30].



Gambar 2.5 Skema penerimaan data dalam sudut pandang daya

$$RSSI (dbm) = T_x Power (dbm) + T_x Gain (dBi) - FSPL + R_x Gain (dBi) \quad (2.1)$$

$$FSPL (dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + K \quad (2.2)$$

Keterangan:

$T_x Power$ = Daya pancar pada antena pengirim (dBm)

$T_x \text{Gain}$	= Gain pada antena pengirim (dBi)
$R_x \text{Gain}$	= Gain pada antena penerima (dBi)
FSPL	= Daya yang hilang diruang bebas (dB)
d	= Jarak antara pengirim dan penerima (km)
f	= Frekuensi (MHz)
K	= Konstanta

Tabel 2.2 Parameter Standar RSSI [31]

RSSI (dBm)	Keterangan
-30 s/d -60	Sangat kuat dan jarak pemancar dan penerima sangat dekat letaknya.
-60 s/d -90	Sangat baik dan cakupannya dekat.
-90 s/d -105	Baik, terdapat beberapa data yang tidak diterima.
-105 s/d -115	Buruk dan dapat menerima tetapi seringkali <i>drop-out</i> .
-115 s/d -120	Sangat buruk dan sinyal lemah sehingga sinyal sering hilang.

2.2.5.2 *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Signal to Noise Ratio atau SNR dapat diartikan sebagai parameter yang menentukan kualitas sinyal yang terganggu oleh derau atau *noise*. SNR menunjukkan kualitas sinyal informasi yang diterima pada sistem transmisi dan juga merupakan batas maksimal sinyal analog yang dapat diterima. SNR juga merupakan perbandingan antara daya sinyal yang diinginkan dan daya sinyal yang tidak diinginkan yang dihasilkan oleh gangguan. Nilai SNR akan sebanding dengan kualitas sinyalnya, tetapi nilai *noise* yang lebih tinggi akan mengakibatkan nilai SNR yang lebih rendah. Kekuatan SNR meningkat dengan jarak transmisi, dan sebaliknya, dimana persamaan untuk SNR terdapat pada persamaan 2.3 [25].

$$SNR = P_r - P_n \quad (2.3)$$

Dimana:

SNR = *Signal to Noise Ratio*

P_r = Daya diterima *receiver* (dBm)

P_n = Daya *noise* saluran transmisi (dB)

Tabel 2.3 SNR Limit LoRa [31]

SF	SNR Limit (dB)
7	-7,5

SF	SNR Limit (dB)
8	-10
9	-12,5
10	-15
11	-17,5
12	-20

Pada tabel 2.3 merupakan SNR Limit yang terdapat pada LoRaWan menentukan sensitivitas penerima. Sementara itu, pada tabel 2.4 merupakan *range* dari parameter SNR sehingga dapat diklasifikasikan kualitas dari sinyal yang diterima dibandingkan dengan *noise* pada jarak tertentu dari pemancar [31].

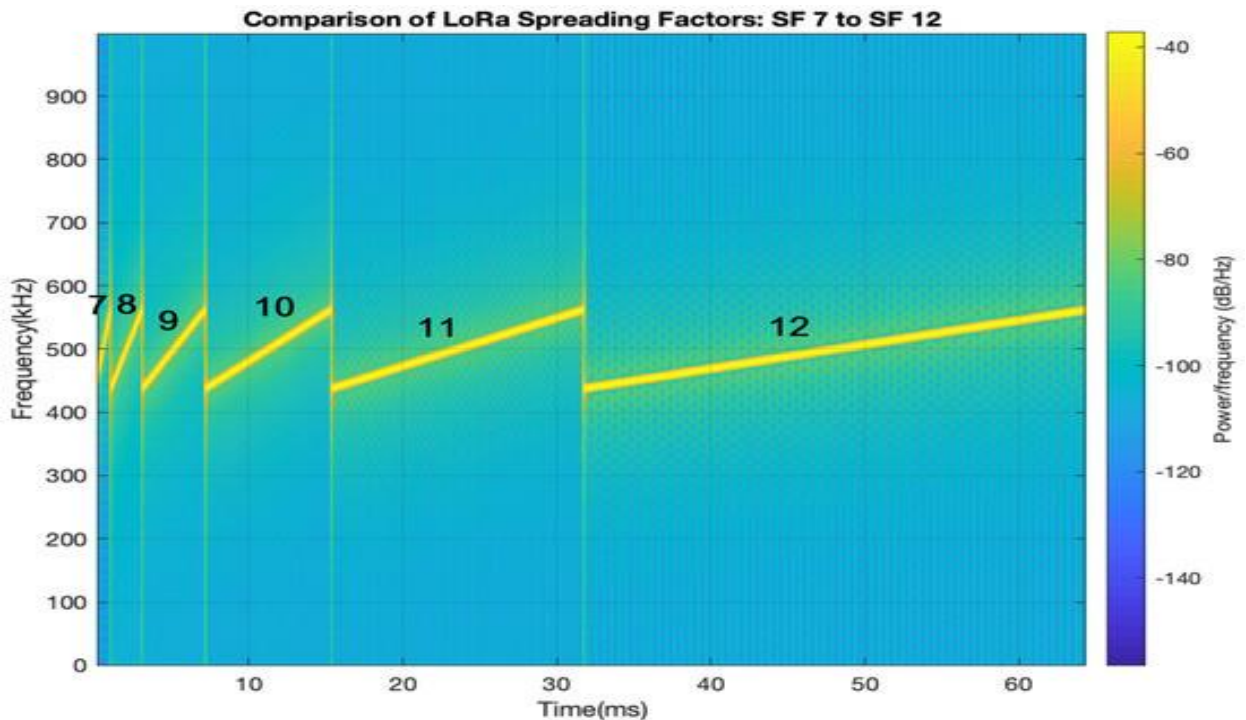
Tabel 2.4 *Range* SNR [31]

SNR (dB)	Keterangan
≥ 15	Luar biasa
10 s/d 15	Sangat bagus
5 s/d 10	Bagus
0 s/d 5	Normal
-5 s/d 0	Buruk

2.2.5.3 *Bandwidth*

Bandwidth dapat dikenal sebagai lebar pita frekuensi, mengacu pada rentang frekuensi radio dalam satuan Hz yang digunakan oleh sinyal LoRa untuk mentransmisikan data melalui udara. Hal tersebut sangat penting untuk mengetahui seberapa baik jaringan nirkabel berbasis teknologi LoRa berfungsi. Lebar *bandwidth* berpengaruh langsung terhadap kecepatan data maksimum yang dapat dicapai oleh sinyal LoRa. Semakin lebar *bandwidth* yang digunakan, semakin tinggi kecepatan data maksimum yang dapat dicapai sinyal LoRa. *Bandwidth* juga mempengaruhi jarak propagasi sinyal LoRa, semakin lebar *bandwidth*, semakin pendek jarak propagasi sinyal LoRa. Hal tersebut karena pada *bandwidth* yang lebih lebar, sinyal lebih mudah mengalami atenuasi atau pelemahan. Penggunaan *bandwidth* pada LoRa, biasanya pada kisaran 125 KHz, 250 KHz, serta 500 KHz [32].

2.2.5.4 Spreading factor (SF)



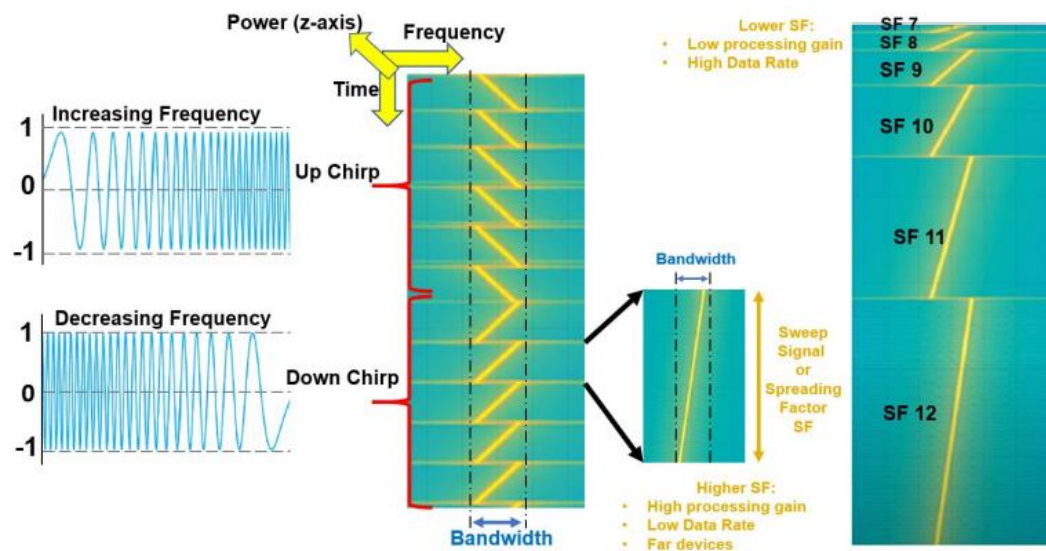
Gambar 2.6 *Spreading factor* [33]

Spreading factor merupakan jumlah bit yang dikodekan dalam setiap simbol. *Spreading factor* memiliki nilai berkisar 7 hingga 12, yang hal tersebut dapat memengaruhi kecepatan dan waktu pengiriman data. Meskipun *Spreading factor* yang tinggi dapat mengurangi persentase kehilangan paket, namun juga dapat memperpanjang waktu pengiriman data. Dalam gambar 2.6 sumbu x menampilkan waktu dalam milidetik, sumbu y menunjukkan frekuensi dalam kHz, dan intensitas warna mencerminkan kekuatan sinyal dalam dB-Hz. *Spreading factor* 7 terlihat sebagai garis paling curam dibandingkan dengan *spreading factor* (SF) lainnya, menunjukkan peningkatan frekuensi yang cepat dalam waktu singkat. SF 8 terletak antara SF 7 dengan SF 9 kemiringan sedikit lebih landai dari SF 7, menunjukkan perubahan frekuensi yang lebih lambat. SF 9 berada di antara SF 8 dengan SF 10 dan kemiringan yang semakin landai, menandakan perubahan frekuensi yang semakin lambat dibandingkan SF 8. SF 10 memiliki kemiringan lebih landai dari SF 9, menunjukkan perubahan frekuensi yang semakin lambat, terletak diantara SF 9 dengan SF 11. SF 11 terletak ≥ 10 hingga 30 ms dengan kemiringan yang lebih landai dari SF 10, menunjukkan perubahan frekuensi yang semakin lambat. SF 12 memiliki kemiringan paling landai dari semua SF, menandakan perubahan

frekuensi yang paling lambat dengan rentang waktu 30 hingga lebih dari 60 ms. Penggunaan SF yang lebih tinggi akan membuat sinyal tersebar lebih lama, meningkatkan kemampuannya dalam mengatasi interferensi dan mencapai jarak yang lebih jauh, meskipun dengan mempengaruhi *bandwidth* dan kecepatan data [33].

2.2.5.5 Modulasi *Long Range*

Lapisan fisik LoRa menggunakan teknik modulasi spektrum penyebaran yang berasal dari modulasi spektrum penyebaran *Chirp*. *Chip Spread Spectrum* (CSS) adalah teknik akses ganda spektrum tersebar yang dapat menampung banyak pengguna secara bersamaan dalam satu saluran. Sebaliknya, *Semtech* hanya menyediakan teknik *spread* spektrum. Modulasi LoRa menggunakan modulasi CSS ditunjukkan dalam Gambar 2.7 [34].



Gambar 2.7 Ilustrasi *Chip Spread Spectrum* LoRa [34]

Terdapat dua jenis *chirp* dalam LoRa yaitu *up-chirp* (frekuensi meningkat dari rendah ke tinggi) dan *down-chirp* (frekuensi menurun dari tinggi ke rendah). Kelebihan metode ini adalah waktu dan frekuensi antara pemancar dan penerima adalah sama, sehingga mengurangi kompleksitas desain penerima. *Bandwidth* frekuensi *chirp* LoRa setara dengan *bandwidth* spektral sinyal. Sinyal data dari perangkat akhir ke *gateway* dipecah pada kecepatan data yang lebih tinggi dan dimodulasi ke sinyal pembawa *chirp*. Modulasi LoRa juga meliputi skema koreksi kesalahan variabel yang meningkatkan ketahanan sinyal yang dikirimkan, di mana

bit informasi paritas kelima dikirimkan untuk setiap empat bit informasi. Semakin besar nilai *spreading factor* yang digunakan maka kecepatan data rendah, pemrosesan gain yang tinggi, serta dapat menjangkau perangkat yang jauh. Semakin kecil *spreading factor* yang digunakan maka kecepatan data lebih tinggi dan pemrosesan gain yang lebih rendah. [34].

2.2.6 Alokasi Frekuensi LoRaWan

Frekuensi LoRaWAN bervariasi dari satu wilayah atau negara ke negara lain, tergantung pada alokasi spektrum dan kebijakan setiap negara. Pada tabel 2.4, menampilkan alokasi frekuensi LoRaWAN secara global. Pada wilayah Indonesia, menggunakan frekuensi dalam rentang 920-923 MHz sesuai dengan Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio Berdasarkan Izin Kelas. Di Indonesia, alokasi frekuensi untuk wilayah negara telah ditetapkan pada rentang 923 MHz dengan kode alokasi AS923-2. Pada kode alokasi AS923-2 ini, terdapat delapan saluran yang tersedia, dengan tujuh saluran digunakan untuk lalu lintas *uplink* dan satu saluran untuk *downlink*. Rentang spektrum yang dialokasikan berada pada 920–923 MHz [35].

Tabel 2.5 Alokasi Frekuensi Pada LoRaWan [35]

	<i>Europe</i>	<i>North America</i>	China	Korea	Japan	India	Indonesia
<i>Frequency Band</i>	867-869 MHz	902-928 MHz	470-510 MHz	920-925 MHz	920-925 MHz	865-867 MHz	920-923 MHz
<i>Channels</i>	10	64+8+8	<i>In definition by Technical Committee</i>	<i>In definition by Technical Committee</i>	<i>In definition by Technical Committee</i>	<i>In definition by Technical Committee</i>	<i>In definition by Technical Committee</i>
<i>Channels BW Up</i>	125/250kHz	125/500kHz					
<i>Channels BW Dn</i>	125kHz	500kHz					
<i>TX Power Up</i>	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)					
<i>TX Power Dn</i>	+14dBm	+27dBm					
<i>SF Up</i>	7-12	7-10					
<i>Data rate</i>	250bps-50kbps	980bps-21.9kbps					
<i>Link Budget Up</i>	155dB	154dB					
<i>Link Budget Dn</i>	155dB	157dB					

2.2.7 Coverage Planning

Coverage Planning merupakan bagian dari perencanaan jaringan berdasarkan parameter *input* dan spesifikasi peralatan dengan adanya pertimbangan seperti, daya pancar, daya terima, *Pathloss*, sensitifitas alat, dan faktor lainnya. Selain itu, proses ini memperhitungkan redaman sinyal yang terjadi sepanjang jalur

propagasi sinyal arah *uplink* dan *downlink*. Hasil perhitungan akan lebih akurat jika digunakan model propagasi yang sesuai [36].

Coverage Planning didasarkan pada perhitungan yang dilakukan mengenai model propagasi dan *Link Budget* yang digunakan. Selain itu, karakteristik keadaan wilayah diperlukan dalam menentukan model propagasi dan melakukan perencanaan jaringan. Keadaan wilayah dibagi menjadi 3 bagian yaitu urban yang diilustrasikan pada gambar 2.10, suburban yang diilustrasikan pada gambar 2.9, dan rural yang diilustrasikan pada gambar 2.8 [36]. Berikut untuk pembagian wilayah berdasarkan 3 bagian:

1. Rural



Gambar 2.8 Klasifikasi Wilayah Rural [37]

Rural merujuk pada area yang didominasi oleh kegiatan pertanian. Daerah pedesaan merupakan lahan terbuka dengan sedikit bangunan atau rumah dan memiliki populasi yang jarang, sehingga kepadatan penduduknya rendah.

2. Suburban



Gambar 2.9 Klasifikasi Wilayah Suburban [37]

Suburban adalah wilayah yang berada di antara pedesaan dan perkotaan, di mana penduduk tinggal di pinggiran kota yang berkembang karena perkembangan kota itu sendiri. Wilayah suburban sering dianggap sebagai daerah peralihan atau daerah yang memiliki karakteristik campuran antara desa dan kota. Masyarakat suburban merupakan penduduk dengan karakteristik yang mencakup sifat-sifat dari masyarakat desa dan kota.

3. Urban



Gambar 2.10 Klasifikasi Wilayah Urban [37]

Kawasan urban biasanya dikenal dengan kepadatan penduduk yang tinggi, bangunan yang padat, serta variasi bangunan yang beragam. Di perkotaan, dapat ditemukan berbagai fasilitas umum seperti jalan raya, sistem transportasi massal, dan beragam tempat usaha serta industri [38].

2.2.8 *Link Budget*

2.2.8.1 *Sensitivity LoRaWan*

LoRa dapat meningkatkan jarak komunikasi karena sensitivitasnya yang tinggi meskipun sinyalnya lemah. Sensitivitas LoRa digunakan untuk menghitung nilai *Maximum Allowable Path Loss* atau MAPL. Pada persamaan 2.7 digunakan untuk mengetahui sensitivitas LoRa [19].

$$\text{Sensitivity} = -174 + 10 \log(BW) + \text{Noise Figure} + (-\text{SNR limit}) \quad (2.5)$$

2.2.8.2 *Maximum Allowable Path Loss (MAPL)*

Maximum Allowable Path Loss (MAPL) digunakan untuk mengetahui pelemahan sinyal maksimum atau nilai tertinggi redaman yang diperbolehkan pada *gateway* dengan *end device*. Untuk mengetahui nilai MAPL perlu diketahui nilai

EIRP terlebih dahulu. Untuk mengetahui EIRP dapat dihitung menggunakan persamaan 2.6 [19].

$$EIRP = T_x \text{ Power} + \text{Gain Antenna } T_x - \text{Loss Cable} \quad (2.6)$$

Setelah nilai EIRP diketahui, nilai MAPL dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7.

$$MAPL = EIRP - \text{Sensitivity} \quad (2.7)$$

2.2.8.3 Model Propagasi Okumura-Hatta

Model propagasi Okumura-Hatta dapat didefinisikan sebagai model propagasi sederhana dengan estimasi *pathloss* cukup akurat. Model propagasi tersebut digunakan untuk menghitung *pathloss* dalam rentang frekuensi 150 s/d 1500 MHz dengan radius seluler 1 s/d 20 km, memiliki tinggi antenna pemancar dari 30 s/d 200 meter, dan tinggi antenna penerima mulai 1 s/d 10 meter. Pada wilayah pinggiran kota, perkotaan, hingga pedesaan menggunakan model propagasi tersebut untuk prediksi *pathloss* karena akurasi dan kesederhanaannya [39]. Pada persamaan 2.8, 2.9, 2.10 merupakan persamaan yang digunakan untuk mengetahui *pathloss* berdasarkan kondisi wilayahnya:

$$PL_{Urban} = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log hb - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log hb) \log_{10} d \quad (2.8)$$

$$PL_{Suburban} = PL_{Urban} - \left(5,4 + 2 \left(\log_{10} \left(\frac{f}{28}\right)\right)^2\right) \quad (2.9)$$

$$PL_{rural} = PL_{Urban} - (40,94 + 4,78(\log_{10}(f))^2 - 18,33 \log_{10}(f)) \quad (2.10)$$

Untuk nilai $a(h_r)$ pada wilayah urban, suburban, dan rural/*open* dapat ditentukan melalui persamaan 2.11.

$$a(h_r) = (1,1 \log_{10}(f) - 0,7)h_r - (1,56 \log_{10}(f) - 0,8) \quad (2.11)$$

Untuk kota besar menggunakan $f \leq 200$ MHz dengan persamaan 2.12.

$$a(h_r) = (8,28[\log_{10}(h_r)^2 - 1,1]) \quad (2.12)$$

Untuk kota besar menggunakan $f \geq 400$ MHz dengan persamaan 2.13.

$$a(h_r) = (3,2[\log_{10} (11,75h_r)^2 - 4,97]) \quad (2.13)$$

Keterangan:

PL_{Urban} = *pathloss* daerah urban (dB)

f = frekuensi yang digunakan

hb = tinggi *transmitter* (30-200 meter)

h_r = tinggi *receiver* (1-10 meter)

d = jarak antara *transmitter* dengan *receiver* (1-20 km)

$a(h_r)$ = *Receiver factor correction*

Untuk parameter $a(h_r)$ merupakan faktor koreksi yang digunakan untuk ketinggian antena seluler berdasarkan ukuran area cakupan. Untuk persamaan yang digunakan pada $a(h_r)$ akan berbeda seperti yang terdapat pada persamaan 2.11 merupakan persamaan yang digunakan untuk wilayah urban, suburban, dan rural. Untuk persamaan 2.12 merupakan persamaan yang digunakan pada kota besar yang menggunakan frekuensi ≤ 200 MHz sedangkan persamaan 2.13 digunakan untuk kota besar yang menggunakan frekuensi ≥ 400 MHz [39].

2.2.8.4 Luas Cell

Dilakukan perhitungan luas *cell* untuk mengetahui besar dari wilayah *cell* yang tercakup pada wilayah yang digunakan. Persamaan 2.14 merupakan persamaan yang digunakan untuk mengetahui luas *cell* [19].

$$\text{Luas Cell} = \frac{3\sqrt{3}d^2}{2} \quad (2.14)$$

Keterangan:

d = jarak *transmitter* ke *receiver*

2.2.8.5 Jumlah Gateway

Perhitungan jumlah *gateway* dilakukan untuk mengetahui jumlah dari *gateway* yang diperoleh berdasarkan perhitungan yang dilakukan. Untuk mengetahui jumlah dari *gateway* yang diperoleh menggunakan persamaan 2.15 [19].

$$\text{Jumlah Gateway} = \frac{\text{Luas wilayah}}{\text{Luas cell}} \quad (2.15)$$